Wie ermittelt man mit dem Venustransit die Astronomische Einheit?

Venusdurchgang und Sonnenentfernung

Von Hans Roth

EDMOND HALLEY hatte angeregt, Venustransite zur genaueren Bestimmung der Astronomischen Einheit (AE, mittlere Entfernung der Erde von der Sonne) auszuwerten. Er hatte nämlich am 7. November 1677 einen Merkurtransit von St. Helena aus beobachten können. Merkurtransite ereignen sich öfters, so im 21. Jahrhundert 14 mal. Der letzte Transit Merkurs vom 22. November 2006 war von Amerika aus zu sehen, der nächste am 9. Mai 2016 wird von Europa aus vollständig zu beobachten sein. Aber für das Ziel einer Bestimmung der AE können diese Vorübergänge nicht verwendet werden, Merkur ist zu weit weg von der Erde und zu nahe an der Sonne.

Grundsätzlich kann man (bei genügender Dämpfung des Sonnenlichts !) einen Venustransit von blossem Auge verfolgen. Es gibt jedoch keine Hinweise, dass eine solche Beobachtung bereits vor der Erfindung des Fernrohrs stattfand. Seit 1610, dem Jahr der ersten astronomischen Fernrohrbeobachtungen durch GALILEI, gab es nur 7 Venustransite. Derjenige vom 7. Dezember 1631 war von JOHANNES KEPLER vorausgesagt worden, ereignete sich aber in Europa vor Sonnenaufgang. Von Asien ist keine Beobachtung bekannt. Den Vorübergang am 4. Dezember 1639 hatte KEPLER nicht erwähnt, er wurde aber von JEREMIAH HORROCKS (1619 – 1641) vorausgesagt und in der Nähe von Liverpool beobachtet. HORROCKS hatte auch einen Bekannten, WILLIAM CABTREE, informiert, der den Vorbeigang ebenfalls beobachten konnte. Die Transite von 1761, 1769, 1874 und 1882 wurden von vielen Astronomen eifrig beobachtet, in der Absicht, durch umfassende Auswertungen die Sonnenentfernung exakter zu bestimmen. 2004 schliesslich haben wir ja den Transit in seiner ganzen Länge «vor der Haustüre» beobachten können. Aber da war die AE um viele Grössenordnungen genauer bekannt, als die Berechnung aus einem Venustransit je möglich wäre. Diese Bestimmung ist nämlich mit einigen Stolpersteinen versehen, und tatsächlich brachten die vielen Expeditionen im 18. und 19. Jahrhundert keine markanten Ergebnisse.

Die Bestimmung der Astronomischen Einheit (AE)

Die Abstände der Himmelskörper im Sonnensystem können dank der Keplergesetze durch Messung der Umlaufzeiten bestimmt werden. Man erhält dabei aber nur die *Verhältnisse* der Abstände voneinander. In der Regel drückt man die Distanzen durch die Astronomische Einheit (AE) aus, sie war ursprünglich als mittlerer Abstand Sonne-Erde definiert. Das Problem war die Bestimmung der wahren Länge dieser Masseinheit (also z.B. in Kilometern). Vom Altertum her hielt man die Entfernung der Sonne für 19 mal grösser als den (damals schon bekannten) Mondabstand. Erst 1672 wurde mit Hilfe des Fernrohrs die richtige Grössenordnung erkannt: die Sonne ist fast 400 mal weiter entfernt als der Mond. Diese (im Ergebnis nicht unumstrittene) Bestimmung durch GIOVANNI DOMENICO CASSINI in Paris und JEAN RICHER in Cayenne gelang durch Beobachtung des Mars in seiner perihelnahen Opposition vom 8. September 1672. Aus der Distanz Erde - Mars ergab sich die AE durch Umrechnen mittels der Keplergesetze.

Beobachtung von verschiedenen Orten aus

Die ursprüngliche Idee von HALLEY war, dass zwei Beobachter mit möglichst grosser Nord-Süd-Distanz die Dauer des Transits messen. Diese Zeiten hielt er für näherungsweise proportional zu den Längen der Sehnen, die von der Venus auf der Sonnenscheibe beschrieben werden (Abb. 1). Da das Abstandsverhältnis Erde-Venus zu Venus-Sonne bekannt ist, kann aus der Basislänge auf der Erde der Abstand der beiden Sehnen auf der Sonne in km ausgedrückt werden. Aus dem von der Erde aus bestimmten Winkelab-

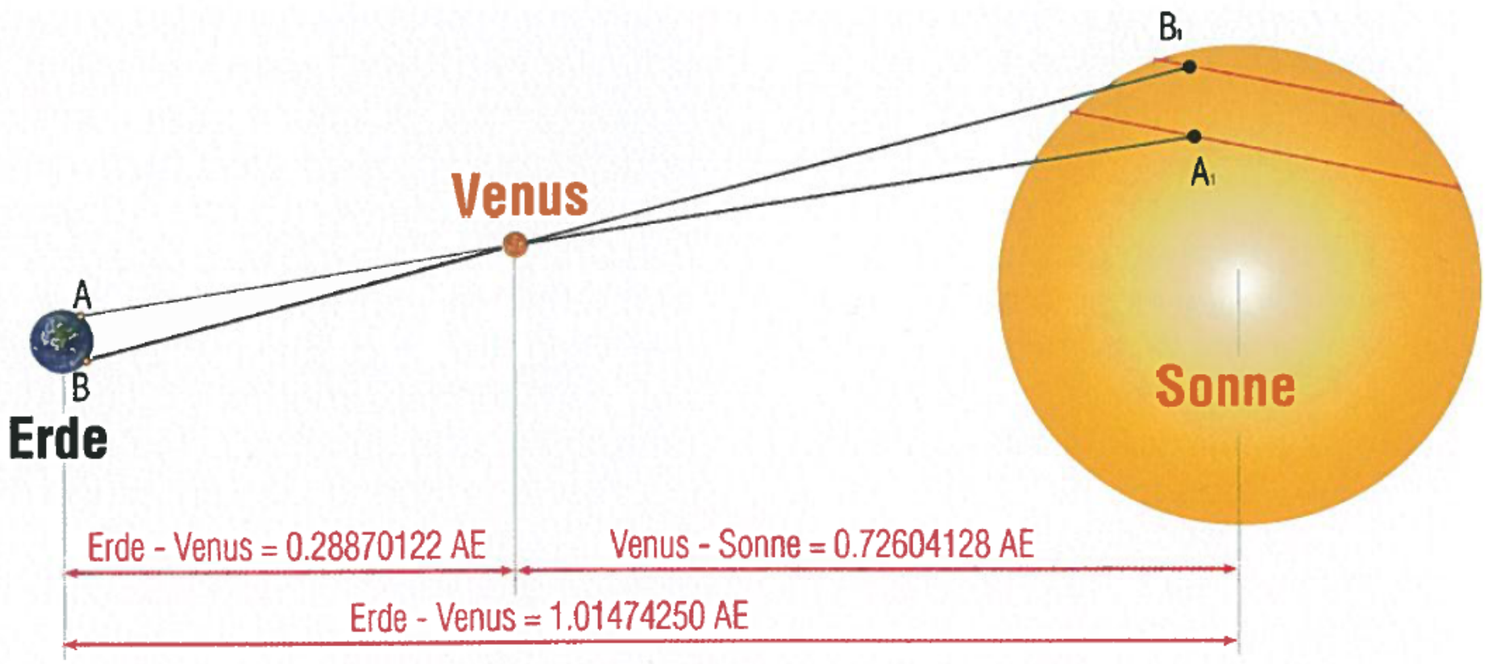

Abbildung 1: Die HALLEY-Methode zur Bestimmung der Astronomischen Einheit. (Grafik: Thomas Baer nach Hans Roth)

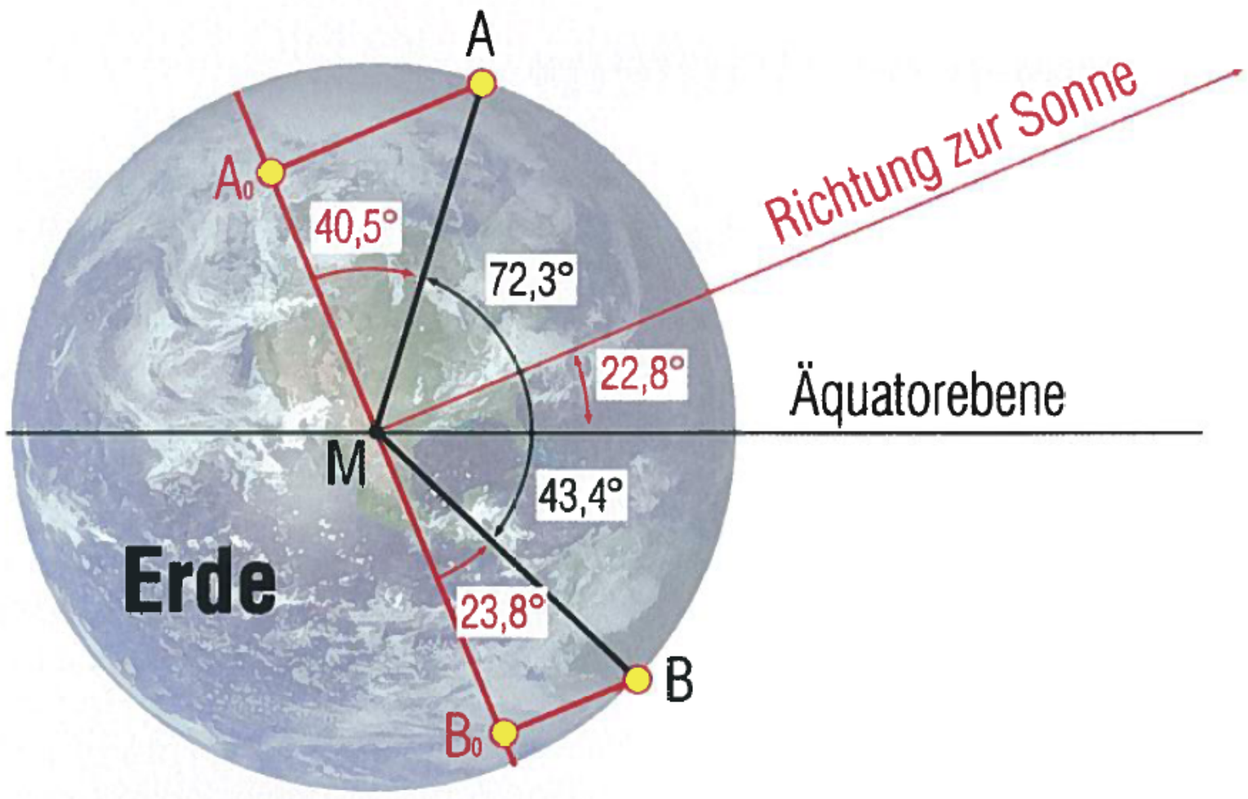

Abbildung 2: Die Basislinie A_0B_0 steht senkrecht auf der Richtung zur Venus. Deren Deklination beträgt am 6. Juni 22.8°. Mit dem Erdradius von 6372 km erhält man 10'675 km für die Strecke A_0B_0. (Grafik: Thomas Baer nach Hans Roth)

stand der Sehnen lässt sich dann der Abstand der Sonne in km berechnen.
Wie schon angedeutet, gibt es bei diesem Vorgehen einige Knacknüsse zu lösen. Das Hauptproblem besteht darin, dass man das Schauspiel nicht von einem ruhenden Punkt aus beobachten kann. Dass sich die Erde (und Venus) während des doch 6 Stunden dauernden Vorgangs um die Sonne bewegen, ginge ja noch. Aber die Beobachter sitzen ja auf der auch noch rotierenden Erde, und machen mit ihr etwa eine Vierteldrehung mit.

Beispiel der Halley-Methode

Machen wir die Probe aufs Exempel. Wir wählen zwei möglichst weit in Nord-Süd-Richtung auseinanderliegende Beobachtungsorte, der Einfachheit halber auf dem gleichen Meridian.
Punkt A im Norden sei die unwirtliche Stelle am Ostsibirischen Meer, gegenüber den Neusibirischen Inseln (Zemlya Bunge) mit den Koordinaten 147°14′ östliche Länge und 72°17′ nördliche Breite.
Besser trifft es der Beobachter B, den wir nach Lunawanna auf der südöstlichen Halbinsel Bruny Island von Tasmanien schicken. Seine Koordinaten sind ebenfalls 147°14′ östliche Länge, aber 43°22′ südliche Breite.
Die Beobachtung können wir heute vorausberechnen, es ergibt sich für A eine Dauer vom 2. bis zum 3. Kontakt von $6^h\ 08^{min}\ 15^s$ und für B von $5^h\ 52^{min}\ 25^s$. Nun möchten wir die beiden Sehnen in einen Kreis einzeichnen und dann den Unterschied in den Abständen vom Mittelpunkt bestimmen. Aber wo sollen wir die Sehnen einzeichnen? Nun, bei einer tatsächlichen Beobachtung hätten wir natürlich verschiedene Fotos aufgenommen und könnten einigermassen feststellen, wo wir die Rechnung etwa ansetzen sollten. Wenn wir dabei von einem Mittelpunktsabstand von etwa 9 Bogenminuten ausgehen (der Sonnendurchmesser ist bei der Beobachtung 31′ 31.42″, derjenige der Venus 57.80″) ergibt das nach einiger Rechnung, dass unsere beiden Sehnen 41.2″ auseinanderliegen.

Die Distanz der beiden Beobachtungsorte, genauer die Basislinie senkrecht zur Richtung zur Venus (Abb. 2) ergibt sich zu 10'675 km. Mit dem Strahlensatz kann man nun auf die Distanz der beiden Sehnen auf der Sonne umrechnen: es sind 26'846 km.
Damit kommen wir zur Schlussrechnung: die 26'846 km entsprechen 41.2", dazu muss man die Sehnen aus einer Distanz von 134.4 Millionen km beobachten.
Das ist mehr als ein Zehntel weniger als der erwartete Wert von 151.8 Mio. km!
Die Expeditionsteilnehmer des 18. Jahrhunderts dürften etwa gleich enttäuscht gewesen sein, wenn sie aus ihren recht unsichern Beobachtungen doch noch ein Ergebnis herauskitzeln wollten und dann auf ähnlich falsche Werte kamen.
Das Problem in unserer Rechnung ist die Karussellfahrt, von der aus die Beobachter das Geschehen verfolgen. Die Annahme, dass die Venus praktisch auf einer Sehne über die Sonne läuft, trifft eben nur auf einen «Beobachter» im Erdmittelpunkt zu. Man muss also die Relativbewegung des Beobachters auf der Erdoberfläche berücksichtigen und entsprechend die gemessenen Zeiten verkürzen (oder verlängern?).

Versuchen wir noch eine andere Methode. Unsere beiden Beobachter sollen gleichzeitig ein Foto machen und dann den Abstand der beiden Mittelpunkte von Sonne und Venus als Winkel bestimmen.
Die Vorausberechnung haben wir für den Zeitpunkt 01:30 Uhr gemacht (das ist für beide Beobach-

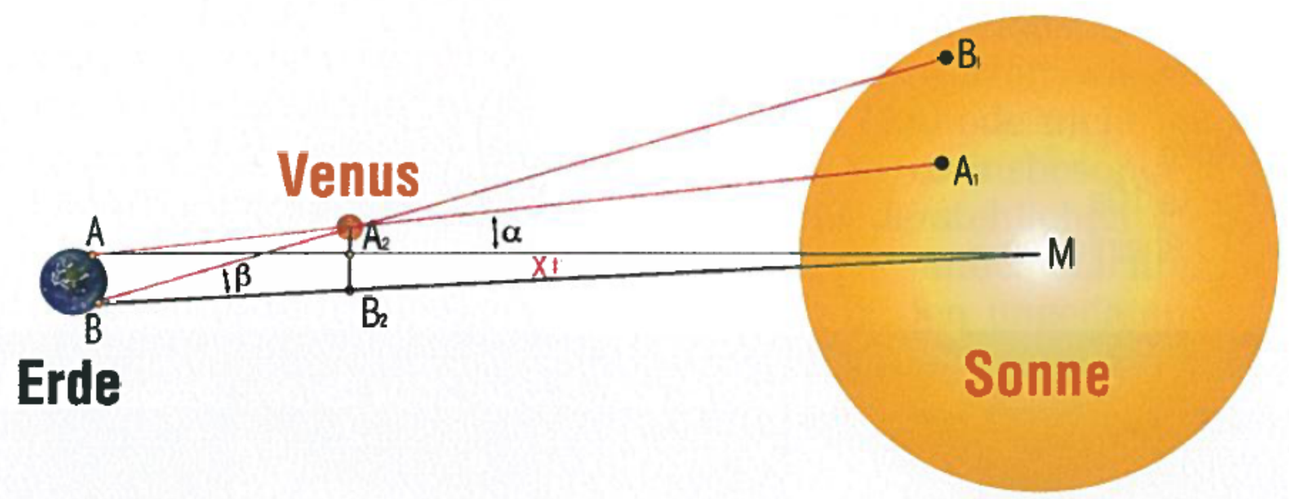

Abbildung 3: Die Rechnung zu dieser Methode ist einfach. Die Strecke VA_2 ergibt sich durch den beobachteten Mittelpunktsabstand α und die Entfernung der Venus in AE, im Beispiel also zu 0.2887 AE · tan (538.1") = 0.000753157 AE und entsprechend wird VB_2 = 0.000801866 AE. Für den gesuchten Winkel x ist also tan (x) = A_2B_2 / 0.7260 und x ist 13.84". Das ist aber auch der Winkel, unter dem die Basislinie A_0B_0 gesehen wird. (Grafik: Thomas Baer nach Hans Roth)

tungsorte nahe am Maximum, aber das spielt keine Rolle). Der Beobachter im Norden sollte dann 538.1″ messen, derjenige im Süden gleichzeitig 572.9″.
Relativ einfach ergibt sich jetzt der Winkel x (Abb. 3). Man erhält x = 13.84″. Das ist nun der Winkel, unter dem ein Beobachter im Erdmittelpunkt die Strecke AB zwischen den beiden Beobachtern sehen würde. Also liefert eine letzte Rechnung 10'675 km / tan x = 159.1 Mio. km. Auch das ist kein berauschendes Resultat. Immerhin ist es "nur" etwa 5% zu gross, aber weil die Methode nicht von der Rotation der Erde abhängig ist, würde man etwas Besseres erwarten. Aber wie genau könnte denn eine solche Bestimmung überhaupt sein? Der Unterschied der beiden Mittelpunktswinkel ist 34.8″, das ist etwas mehr als der halbe Durchmesser der Venus auf den Fotos! Schon ein Messfehler von 1″ verändert das Ergebnis um fast 5 Mio. km.
Möchte ein Leser versuchen, die AE aus Beobachtungen zu bestimmen, so empfehlen wir eine dritte Methode, die Suche nach der besten Übereinstimmung. Man erfasse die Zeiten des zweiten und dritten Kontaktes möglichst genau (z. B. mit Serienbildaufnahmen, aus denen man die effektiven Zeitpunkte trotz allfälligem «schwarzen Tropfen» (Abb. 4) extrapolieren kann). Dann verwende man eine Berechnungsmethode für die Kontaktzeiten. In diese geht als einzige Distanz in km der Erdradius ein. Man berechnet nun die Kontaktzeiten, indem man den Erdradius als AE-Wert eingibt und diese Eingabe systematisch ändert, bis sich die passendsten Werte für die Kontaktzeiten ergeben. Dann erhält man aus dem eingegebenen Wert und dem tatsächlichen Erdradius die Astronomische Einheit in km.

Hans Roth
Marktgasse 10a
CH-4310 Rheinfelden

Der «schwarze Tropfen»

Das ominöse «Tropfenphänomen» ist im Vorfeld des Venustransits von 2004 erschöpfend diskutiert worden. Unsere Vorfahren hatten diesen optischen Effekt genau nach dem 2. und kurz vor dem 3. Kontakt während des Transits beobachtet. Es bildete sich eine schmale tropfenförmige Brücke zwischen der schwarzen Venusscheibe und dem Sonnenrand, wodurch exakte Messungen praktisch unmöglich waren oder arg verfälscht wurden.
Lange Zeit schrieb man dieses «Tropfenphänomen» der Venusatmosphäre zu. Beobachtungen am 8. Juni 2004 haben jedoch gezeigt, dass der Effekt in grossbrennweitigen Fernrohren praktisch ausblieb, während er in Teleskopen mit kürzeren Brennweiten wahrgenommen werden konnte. Es handelt sich somit um ein optisches Phänomen, das mit abnehmender Stärke des Beobachtungsinstruments ausgeprägter ausfällt. Ein einfaches Experiment veranschaulicht, dass wenn sich zwei Schatten (z. B. der Hände) vor einem hellen Hintergrund annähern, sich diese unmittelbar vor der eigentlichen Berührung nach aussen «ausbeulen», ehe sie zu einem gemeinsamen Schatten verschmelzen. (tba)

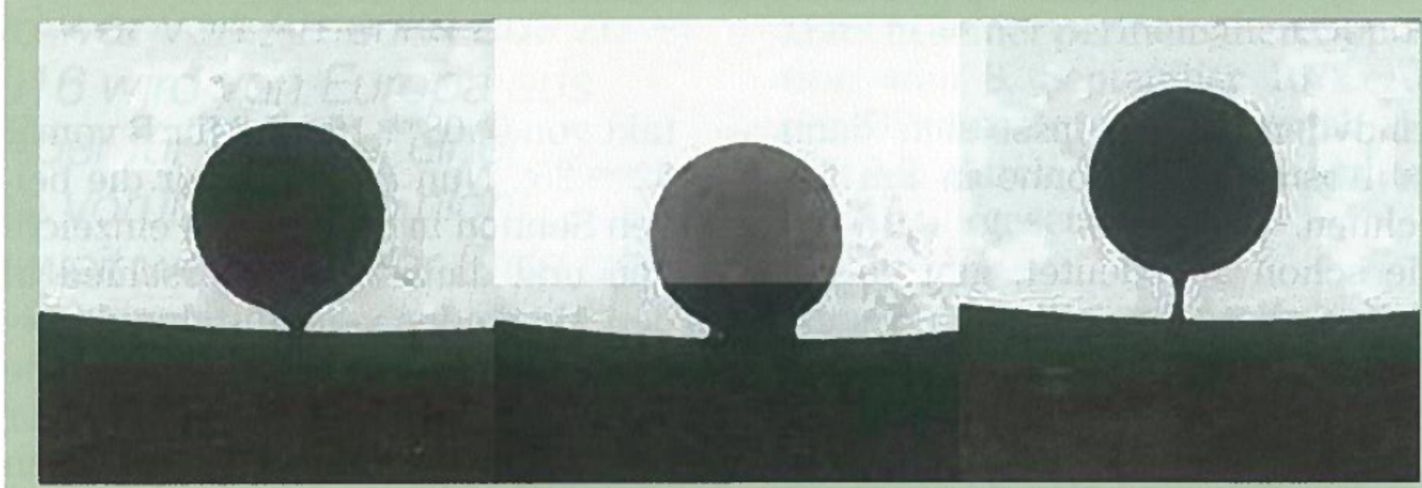

Abbildung 4: Der «schwarze Tropfen» stellte früher ein Problem dar. Er erschwerte eine exakte Bestimmung der Kontaktzeiten. (Zeichnungen vom 9. Dezember 1874, in New South Wales, Australien)

Verwendete und empfohlene Literatur

- Jean Meeus: Transits, Willmann-Bell 1989, ISBN 0-943396-25-5 (enthält die Formeln für die Kontaktzeiten)
- Jean Meeus: Astronomische Algorithmen, Barth Leipzig 1992, ISBN 3-335-00318-7
- US Naval Observatory et al.: Astronomical Almanac for the Year 2012, Washington 2010, ISBN 978-0-7077-41215
- Hans Roth, Der Sternenhimmel 2004, Kosmos Stuttgart, ISBN 3-440-09399-9
- Hans Roth, Der Sternenhimmel 2012, Kosmos Stuttgart, ISBN 978-3-440-12676-9
- http://eclipse.astroinfo.org/transit/venus/
- http://eclipse.astroinfo.org/transit/venus/tabelle21jh.html
- http://www.astronomie.info/calsky/Sun/index.html/7
- http://eclipse.astronomie.info/2012/

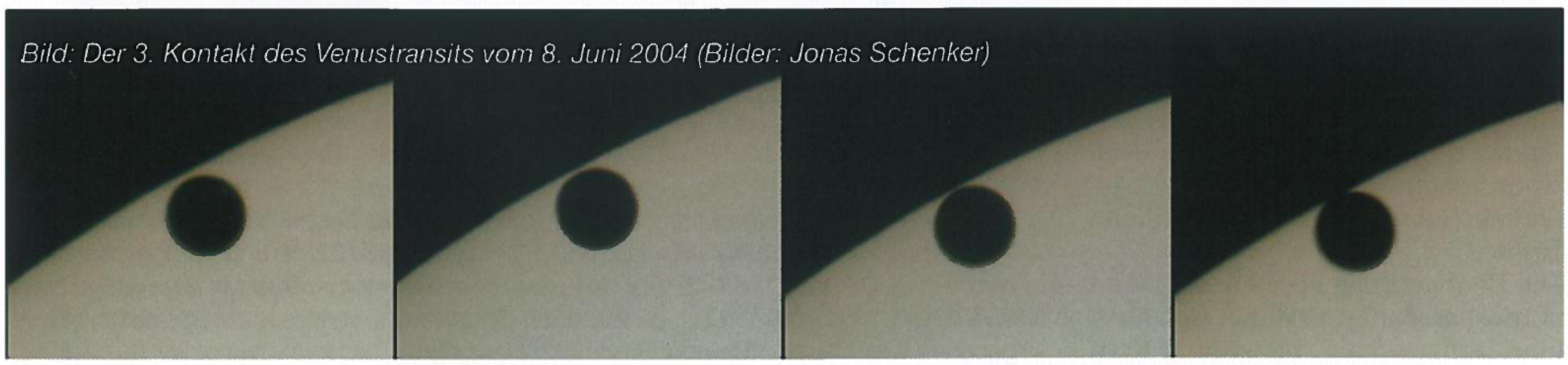

Bild: Der 3. Kontakt des Venustransits vom 8. Juni 2004 (Bilder: Jonas Schenker)